

Т. Р. Суаридзе*, Ю. В. Хлебникова, Д. П. Родионов, Л. Ю. Егорова

Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

Teona_S@imp.uran.ru

Научный руководитель – ст. науч. сотр., канд. техн. наук. *Ю. В. Хлебникова*

ПОЛУЧЕНИЕ ОСТРОЙ КУБИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ ПРИ ПРОКАТКЕ И ОТЖИГЕ В ТОНКИХ ЛЕНТАХ ИЗ БИНАРНОГО СПЛАВА МЕДИ С ИТТРИЕМ

Проведено исследование структуры и процесса текстурообразования в бинарном сплаве Cu-1%Y при холодной деформации прокаткой со степенью порядка 99 % и последующем рекристаллизационном отжиге. Показана принципиальная возможность реализации совершенной кубической текстуры в тонкой ленте из сплава меди с иттрием. Определены оптимальные режимы рекристаллизационного отжига, позволяющие получить биаксиальную текстуру с содержанием кубических зерен $\{001\}\langle 100 \rangle \pm 10^\circ$ на поверхности текстурованной ленты более 95 %.

Ключевые слова: сплавы меди, холодная деформация прокаткой, отжиг, рекристаллизация, совершенная кубическая текстура.

T. R. Suaridze, Yu. V. Khlebnikova, D. P. Rodionov, L. Yu. Egorova

OBTAINING A SHARP CUBE TEXTURE DURING ROLLING AND ANNEALING IN THIN TAPES FROM A BINARY ALLOY OF COPPER AND YTTRIUM

The structure and texture formation are investigated in Cu-1%Y binary alloy subjected to 99 % cold rolling followed by recrystallization annealing. The possibility of obtaining a perfect cubic texture in a thin tape made of a binary alloy copper with yttrium is shown. Optimum annealing conditions are determined to form a perfect biaxial texture with more than 95% cubic grains $\{001\}\langle 100 \rangle \pm 10^\circ$ on the surface of the textured tape in the Cu-1%Y alloy.

Keywords: copper alloys, cold rolling deformation, annealing, recrystallization, perfect cubic texture.

После холодной прокатки со степенями выше либо равными 97 % и рекристаллизационного отжига в ряде ГЦК-металлов с высоким и средним значением энергии дефектов упаковки (ЭДУ), таких как Ni, Cu, Al, Pt, Pd, и некоторых сплавов этих металлов реализуется острая кубическая текстура $\{100\}\langle 001 \rangle$. Протяженные ленты из этих ГЦК-металлов и сплавов с кубической текстурой рекристаллизации могут быть использованы в качестве подложек для нанесения многослойных

функциональных композиций, в том числе в конструкции высокотемпературных сверхпроводящих проводов второго поколения (*2G HTSC*) [1]. Токонесущая способность сверхпроводника сильно связана с его кристаллической упорядоченностью или текстурой. Существующие межзеренные границы в сверхпроводящем слое создают препятствия протеканию тока сверхпроводимости, но они уменьшаются при увеличении степени текстурованности. Если сверхпроводник сохраняет высокую степень совершенства текстуры на относительно больших расстояниях, будет обеспечена его способность нести высокую плотность критического тока. Высокую степень кристаллографической упорядоченности или текстуры можно получить, выращивая тонкий слой материала эпитаксиально поверх гибкой текстурованной ленты-подложки. Важно, чтобы материал подложки был немагнитен при рабочей температуре высокотемпературного сверхпроводника (77 К), т. к. магнитное поле оказывает существенное влияние на величину критического тока в сверхпроводящем слое. Чем меньше магнитная проницаемость подложки, тем больше критический ток. Кроме того, для производства длинных лент в промышленности необходимо иметь достаточно высокие прочностные свойства несущей металлической основы, поскольку именно она обеспечивает структурную целостность эпитаксиально нанесенных на нее слоев.

Разработка нового оборудования и опробование линий передачи электроэнергии с низкими потерями с использованием технологии *2G HTSC* диктуют необходимость создания немагнитных и по возможности недорогих металлических лент-подложек, что возможно при использовании сплавов на основе меди. В связи с предельно низким значением ЭДУ меди (порядка 40–50 эрг/см²) выбор легирующих элементов для сплавов Cu–Me, в лентах из которых можно было бы реализовать острую кубическую текстуру, крайне ограничен. Была рассмотрена возможность получения лент-подложек из сплавов Cu–Fe и Cu–Cr, в которых существует область ограниченной растворимости легирующего элемента в медной ГЦК-матрице, а при низких температурах – протяженная область, состоящая из ГЦК твердого раствора на медной основе и частиц чистого легирующего элемента Fe или Cr, имеющего ОЦК-решетку [2; 3]. В настоящее время в мире, а теперь и в России активно ведется поиск новых составов сплавов на основе меди, которые можно было бы после холодной прокатки и рекристаллизационного отжига применять в качестве лент-подложек.

Иттрий не используется в промышленных сплавах на основе меди как в бинарных, так и в многокомпонентных. Но в силу того, что в системе Cu–Y существует область ограниченной растворимости аналогично изученным ранее бинарным сплавам Cu–Fe и Cu–Cr [2, 3], представляется

целесообразным исследовать возможность получения лент-подложек из данного бинарного сплава.

Сплав Cu-1% Y был выплавлен на основе чистой бескислородной меди 99,95 % и иттрия чистотой не ниже 99,9 % в вакуумной индукционной печи. Слиток ковали при температуре 800–600 °C на прутки сечением 10×10 мм. После шлифовки были получены заготовки сечением 9×9 мм, которые далее отжигали при температуре 550–600 °C 1,5 ч. Холодная деформация заготовок осуществлена прокаткой до толщины порядка 85 мкм (общая степень деформации составила порядка 99 %). Рекристаллизационные отжиги для получения кубической текстуры были проведены в вакууме $(2-3) \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. при температурах 600, 700 и 750 °C в течение 1 ч.

Содержание 1 вес. % Y в выбранном для исследования сплаве соответствует значению предельной растворимости иттрия в медной матрице при температуре (890 ± 10) °C. В системе Cu-Y может образовываться в разных концентрационных интервалах несколько отличающихся по составу интерметаллидных фаз. При охлаждении слитка сплава Cu-1% Y ниже температуры (890 ± 10) °C происходит эвтектическая реакция: *жидкость* (12.5 вес. % Y) \leftrightarrow Cu₆Y + α -Cu. Это означает, что включения в сплаве Cu-1% Y представляют собой фактически не отдельные частицы интерметаллида, а области эвтектического распада. Интерметаллидное соединение Cu₆Y, образовавшееся в результате эвтектического превращения и содержащее 18.9 вес. % Y, имеет ГПУ кристаллическую решетку. Объемная доля участков, содержащих интерметаллидную фазу Cu₆Y с ГПУ-решеткой в данном случае, составляла не более 5 %. Включения в структуре сплава были распределены равномерно, и они образовывались преимущественно по границам зерен.

В чистой бескислородной меди наиболее острая кубическая текстура формировалась в процессе часового отжига при температуре 600 °C, при повышении температуры отжига до 700 °C начиналась вторичная рекристаллизация, приводящая к деградации кубической текстуры [3]. В меди температура начала первичной рекристаллизации составляла порядка 200 °C, а в сплавах Cu-Cr и Cu-Fe, исследованных в работах [2; 3], рекристаллизация начиналась при более высокой температуре примерно от 250 до 330 °C для разных сплавов, поэтому для создания высокотекстурованного состояния в данных сплавах успешно применялись температуры отжига от 700 до 850 °C. На основе этих данных для сплава Cu-1% Y были выбраны температуры рекристаллизационного отжига: 600, 700 и 750 °C. В результате часового отжига уже при температуре 600 °C в сплаве сформировалась острая кубическая текстура (рис. 1, а, б). На EBSD-микрокарте ориентировок зерен хорошо видно, что подавляющая часть зерен имеет слабо различающуюся ориентацию. Существенное отклонение

от основной ориентировки происходит лишь в областях, содержащих интерметаллидную фазу Cu_6Y (светлые зерна на рис. 1, *а*). Увеличение температуры рекристаллизационного отжига до 700°C практически не повлияло на степень остроты кубической текстуры (рис. 1, *в*, *з*).

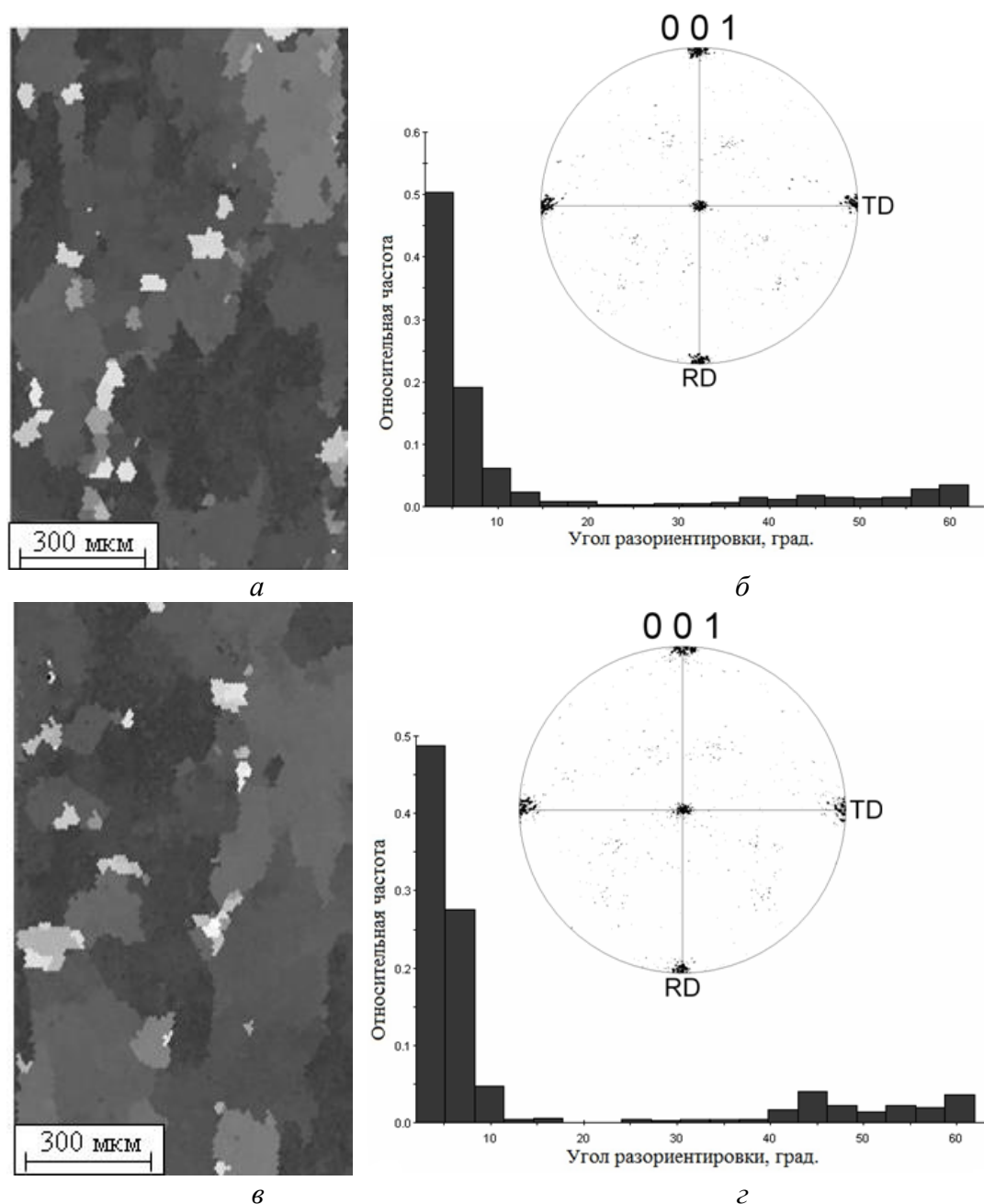


Рис. 1. EBSD-микрокарты ориентировок зерен (*а*, *в*), полюсные фигуры $\{001\}$ и частотные распределения углов разориентировки границ зерен (*б*, *з*) на поверхности текстурованных лент из сплава Cu-1\%Y после отжига в течение 1 ч при 600°C (*а*, *б*) и 700°C (*в*, *з*). Доля зерен с кубической ориентировкой более 95 %

Количество зерен с ориентацией $\{001\}\langle 100 \rangle \pm 10^\circ$ на поверхности текстурованной ленты после отжига при 600°C и 700°C составило 95,4 и 95,9 % соответственно. Рекристаллизационный отжиг при 750°C , 1 ч,

который успешно применялся для сплавов Cu–Cr и Cu–Fe, оказался слишком высоким для формирования и сохранения совершенной кубической текстуры в сплаве Cu-1%Y, т. к. в структуре наблюдались признаки развития вторичной рекристаллизации и, следовательно, снижение доли кубических зерен. Оценка механических свойств текстурованной ленты из сплава Cu-1%Y показала, что легирование меди иттрием позволяет повысить прочностные свойства ленты вдвое по сравнению с лентой из чистой меди.

Работа выполнена при поддержке проекта УрО РАН № 15-17-2-16 и гранта РФФИ № 16-03-00043.

ЛИТЕРАТУРА

1. Токонесущие ленты второго поколения на основе высокотемпературных сверхпроводников / под ред. А. Гояла ; пер. с англ. под ред. проф. А. Р. Кауля. М. : ЛКИ, 2009. 432 с.
2. Создание текстурованных лент-подложек из сплавов Cu-Fe для высокотемпературных сверхпроводников второго поколения / Ю. В. Хлебникова [и др.] // ПЖТФ. 2014. Т. 40, № 19. С. 27–33.
3. Анализ структуры и механических свойств текстурованных лент-подложек из бинарных медных сплавов после старения / Ю. В. Хлебникова [и др.] // ЖТФ. 2015. Т. 85, вып. 10. С. 69–74.